

平均水位変動が混合粒径の海浜地形と底質特性に及ぼす影響

Characteristic of Beach Profile and Sediment at Mixed Sand Beach under Variations of Sea Water Level

辻本剛三¹・酒井大樹²・山田文彦³・柿木哲哉⁴・宇野宏司⁵

Gozo TSUJIMOTO, Daiki SAKAI, Fumihiko YAMADA
Tetsuya KAKINOKI and Kohji UNO

The aim of the paper was to understand the mechanisms of sediment transport due to water level changes under wave actions. Because in low-energy beach, the effects of tidal level fluctuations become increasingly important and could affect beach profile. Measurements of bed profiles, sediment grain size and wave conditions have been carried in the field and an experimental water flume. The size of berm increased under depositional waves on the flood, and the offshore bar moved further seaward on the eddy under erosive waves. With the rise and fall of the tide, the sediment sorting has been developed horizontally and vertically, therefore, the grain size and the porosity inside the bed would change.

1. はじめに

海浜の地形や底質特性の変化に関する研究は、外洋に面した高波浪の影響下の開放性の海浜を対象としていることが多い。一方、内湾などの閉鎖性の海域に面した海浜は、吹送距離等が制限され波エネルギーも小さく静穏性が高く‘low-energy-beach’と称されており（以後、LEB）、Jacksonら（2002）はLEBを静穏時の波高（ $< 0.25\text{m}$ ）、岸向きの強風時の波高（ $< 0.5\text{m}$ ）の波浪下の海浜と定義している。LEBでは人口密度も高く、経済活動も活発であるため、LEBの維持管理は極めて重要である。しかしながらLEBに関する知見が乏しいため、外洋に面した海浜の知見をスケールダウンして準用していることが多い。例えば外洋に面した海浜の分類に基づく逸散型海浜と反射型海浜はLEBには存在しないため、Jacksonら（2002）はその準用が適切でないと指摘している。

Heggeら（1996）は現地データーを整理してLBEの地形を①concave②moderately concave③moderately steep④steppedに分類している。Gonzalez-Villanivaら（2007）はLEBにおいて1潮汐間の地形変化について現地調査を行い、Shermanら（1994）やCiavola（1997）が示した碎波波高と移動層厚との関係とは異なる結果として、底質の移動層厚には海面と地下水面との比が重要であることを示している。上げ潮時は前浜が侵食され徐々に陸側に移動し、碎波帯より陸側と海側で堆積する。一方、下げ潮時

に碎波点では侵食されるが、堆積は碎波点より陸側に限定されることを示している。LEBでは局所的な風波と水位変動による影響が極めて重要であるとされている。このようにLEBでは潮汐による平均水位変化の影響が極めて大きく、また、混合粒径海浜となっていることが多い。

LEBの観点に限定はしていないが、潮位変化による地形や底質特性に関して、斉藤（1973）は急勾配の海浜で干潮、満潮、平均潮位時に底質調査を2潮汐間実施し、干潮面付近では粒度変動が少なく、満潮面付近では逆に著しいことを示している。服部ら（1981）は平均水位変動下で漂砂機構に及ぼす影響として、碎波帯幅の変化が支配的であるとして、水位上昇時には沖向き、下降時には岸向きの漂砂量が発生するとしている。宇多ら（1989）は前浜の底質粒径が時空間的に変動することに着目して、バーム形成時の底質粒径の変化について現地調査を行っている。Trimら（2002）は波と潮位変化を考慮した海浜変形実験を行い、波浪条件がほぼ同じでも、潮位変化によって卓越する漂砂方向が異なることを示している。

平均水位の変動の時間スケールとしては、1年間とするのか半日程度のスケールにするかによって扱う現象が異なる。前者に関して辻本ら（2010）は現地海岸での約1年間の岸沖断面地形と底質特性について検討を行っている。本研究では、半日～1日間の潮位変動に伴う水位変動に着目して、混合粒径で形成されている海浜の岸沖海浜地形と底質特性を明確にすることを目的とする。

2. 現地調査

(1) 調査概要

現地地点は辻本ら（2010）が月1回の頻度で継続調査を行っているアジュール舞子海岸である（図-1）。当該海

1 フェロー 工博 神戸市立高専都市工学科教授
2 学生会員 大阪市立大学大学院
3 正会員 博(工) 熊本大学大学院自然科学研究科教授
4 正会員 博(工) 神戸市立高専都市工学科准教授
5 正会員 博(工) 神戸市立高専都市工学科准教授

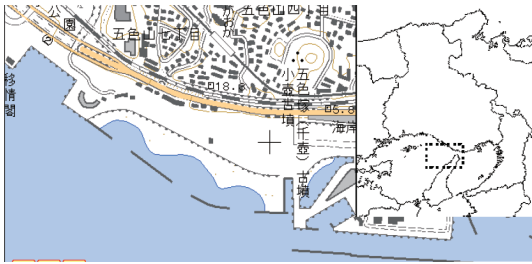


図-1 調査場所

岸は瀬戸内海の淡路島に面し前面を離岸堤で囲まれ、静穏性が高く潮位の影響を受けやすい。潮位変化の影響を考慮するため、平成21年2月22、23日、5月9、10日に調査を行った。陸側に設けた基準点より沖側に向かって測線を設置し、0.5m間隔で地盤高、0.5～1.0m間隔で粒度分析を行った。測線長は観測時の潮位に依存するため、2月は約9m、5月は17mであった。粒度分析はデジタル画像より算定するRubin (2004) の方法を用いており、その妥当性について、辻本ら (2008) は確認している。5月には水圧式波高計による水位計測を実施した。

(2) 調査結果

観測期間中の潮位、風向・風速 (2月) の値を図-2に示す。潮位は調査場所より東側15kmの神戸港、風向・風速は西側5kmの明石のデーターを用いた。観測は両月ともに干潮時の12時頃より始めた。観測期間に2回の干満が生じている。2月の観測期間の風向は北よりの風が卓越しており、翌日の早朝から昼後にかけて西寄りの風が変わっているが、風速は数m/s程度である。

図-3に2月の断面形状を示す。T.P.+1.0m付近で堆積し、T.P.+0.5m付近で侵食されている。2回目の上げ潮時に7m/s程度の風が吹いており、この時の影響をうけているものと推測される。

図-4に粒径、淘汰係数の観測断面の平面分布を示す。観測点を表層より数mm毎にスライスし、その表面の画像から算出した。粒径画像の撮影深が一様でないため、縦軸zは平均撮影深 (10cm)、横軸xは測線長さ (9.5m)

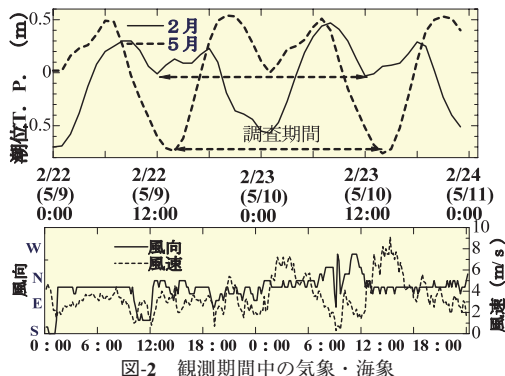


図-2 観測期間中の気象・海象

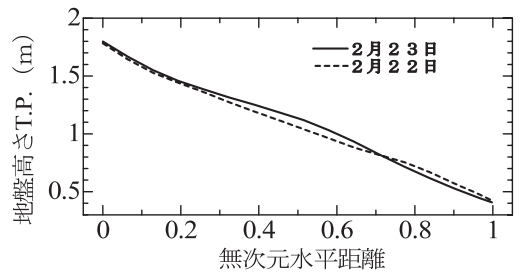


図-3 2月の断面形状

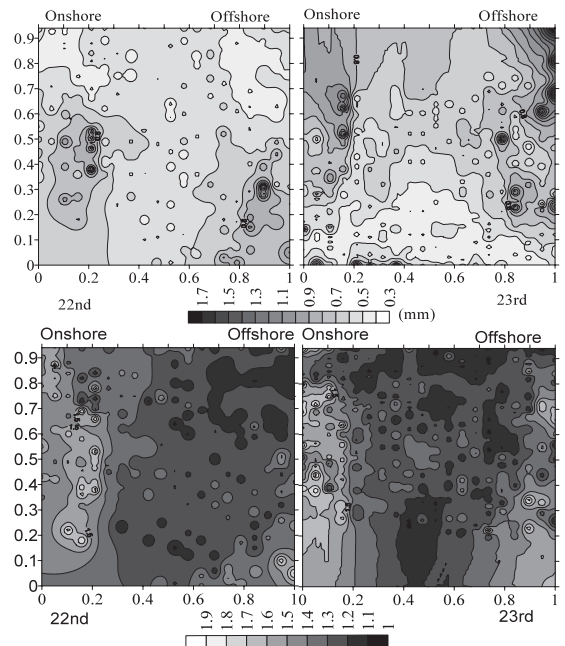


図-4 粒径 (上図) と淘汰係数 (下図) の岸沖分布 (2月)

で無次元化し、縦軸の上方が表面である。2潮汐後に堆積部分 $x=0.4\sim0.6$ では表層付近の粒径が 0.45mm 程度で細粒化しているが、 $z=0.5$ 以下では 0.6mm 程度の粗粒成分が堆積している。侵食部 $x=0.9$ 付近では侵食されて、下層の底質が露出し 0.7mm 以上で粗粒化している。

淘汰係数は1.25程度であれば篩分けが良好である。堆積部は1.1～1.3でありほぼ均一な粒径で構成されていることが解る。侵食された箇所では、やや不均一な粒径となっている。

5月は潮位差が 1.3m 程度あったため、測線長は2月の2倍程度であった。観測期間中の平均波高と周期は 7.0cm 、 4.4 秒であり極めて穏やかであった。そのため両日の断面形状の変化は極めて小さかった。最上点付近の底質粒径と淘汰係数の鉛直分布を図-5 (a) に示す。前日より 3cm 程度堆積しているので表面の位置を一致させて描いている。表層付近は淘汰係数がやや大きくなり不均一な粒度で構成されていることがわかる。

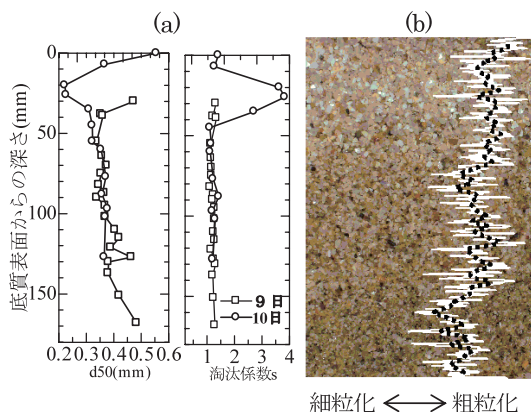


図-5 粒径と淘汰係数の鉛直分布と空間相関の鉛直変動

鉛直方向に底面をスライスした画像では図-5 (a) のように各層の粒径や淘汰係数は算出することは可能であるが、スライス幅を一定にすることが困難であるため、鉛直方向にコア抜きした断面より底質特性を検討した。具体的には画像を鉛直方向に数ピクセルの層に分割し、その層において数ピクセル移動させた2枚の画像の空間相関係数を算出した。粒径が大きい場合は相関が高く、小さい場合は相関が低くなる。図-5 (b) にコア抜きした断面の各層における粒子間の相関係数の鉛直分布の一例を示す。図の右側ほど粗粒子、左側ほど細粒子であることを意味している。図中の白線は各層の相関係数の変動であり、点線はその値を移動平均したものである。

このような画像から各測点での各相関係数の頻度分布を算出した結果の例を図-6に示す。5月の断面変化が小さく、粒径等の変化は顕著ではないが、相関係数のピークが移動しており、2m付近は細粒化、9m付近は逆に粗粒化したことが解る。山田ら (2009) は、現地や室内実験でコアサンプルした資料を底質粒径以下の間隔でX線CT分析を行っているが、現時点では底質粒径の算定には至っていない。本研究の方法は簡易に短時間で鉛直方向の粒度特性の把握できる。

3. 室内実験

(1) 実験装置

2次元造波水槽 (長さ18m, 幅0.6m, 高さ0.8m) の一端に中央粒径0.46mmと0.28mmの底質を混合し、1/15配

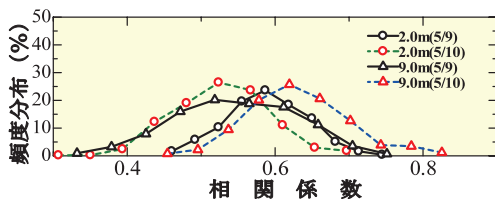


図-6 相関係数の頻度分布

表-1 実験の底質条件

d25 (mm)	d50 (mm)	d75 (mm)	淘汰係数	偏わり度係数
0.36	0.46	0.62	1.31	1.03

表-2 実験の波浪条件

	水深(cm)	平均波		有義波	
		波高(cm)	周期(秒)	波高(cm)	周期(秒)
堆積型	35	2.0	0.89	3.2	1.04
	40	2.2	0.89	3.5	1.03
	45	2.3	0.91	3.8	1.07
中間型	35	7.1	1.23	11.3	1.41
	40	7.5	1.21	12.3	1.41
	45	7.7	1.19	12.9	1.4
侵食型	35	6.7	1.19	10.6	1.38
	40	7.3	1.22	11.3	1.35
	45	7.8	1.22	12.3	1.35

の移動床を長さ6mで作成した。表-1に使用した底質の条件を示す。プレットシュナイダー・光易型のスペクトルを有する堆積型、中間型、侵食型の不規則波を作用させた。平均水位の変動は1潮汐間に作用する波数が現地と同程度になる様に低潮位 (35cm) ~ 平均潮位 (40cm) ~ 高潮位 (45cm) ~ 平均潮位 (40cm) ~ 低潮位 (35cm) を5時間連続して変化させた。平均水位の変動幅は現地海浜と直接対応させることが出来ないために、水位変動の影響が入射波高の変化を10%以下になるように設定した。75分毎にレーザー距離計で地形を2cm間隔、デジタルカメラで表面粒径を10cm間隔で計測した。粒径の鉛直分布は最終地形の表面を数mmずつスライスして計測した。表-2に実験波の条件を示す。

(2) 実験結果

図-7に堆積型波浪条件下の断面形状、漂砂量、表面の初期粒径からの偏差を示す。低潮位から平均潮位にかけて形成されたバームは徐々に陸側に移動し、漂砂量のピークも平均潮位付近に見られ、粗粒成分が卓越している。その後、平均潮位から高潮位にかけて、細粒子成分が卓越して移動しているため漂砂量も増大し、さらに陸側に移動したバームはやや大きくなっている。柿木・辻本 (2009) は遡上域での地形変化と底質粒径の同時計測を行い、時間経過に伴い、移動する粒径が粗粒成分から細粒成分に変化し、一樣になることを示している。

高潮位から低潮位にかけて潮位が低下するに連れて、粗粒成分が移動し漂砂量も減少する。潮位変化が存在することで上げ潮時に最遡上点付近で形成された地形は、そのままの形状を保つことになる。粒径の標準偏差の岸沖分布には3つのピークが見られ、各潮位時の最遡上点付近に相当する。他の波浪条件においても共通するが、平均潮位付近となる水平距離1.5mの領域は潮位変動によりswash-zone, surf-zone, shoaling-zoneと変化することにより、底質の移動形態が異なる。

最終地形においてバームが形成された、水平距離0.25,

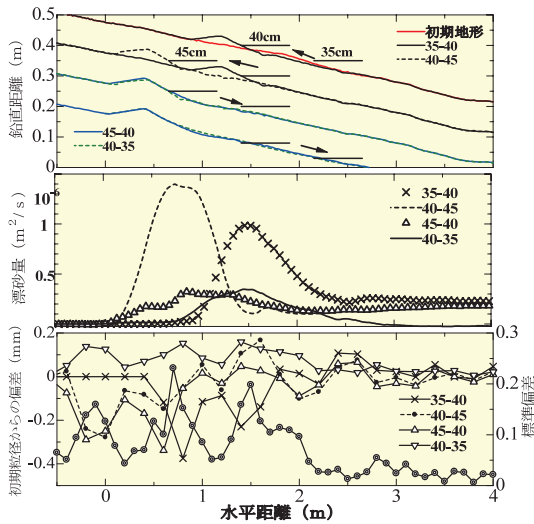


図-7 堆積型波浪の実験結果

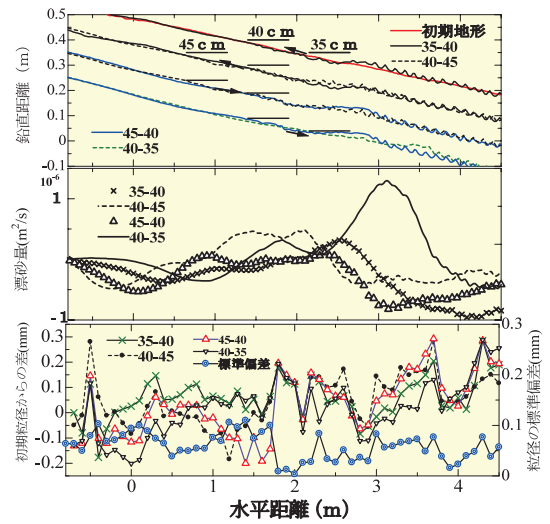


図-9 中間型波浪の実験結果

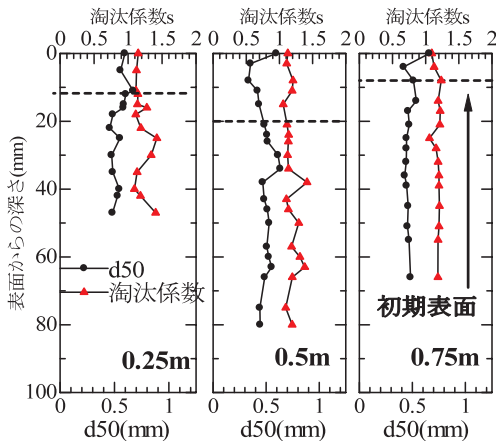


図-8 底質特性の鉛直分布

0.5, 0.75m地点の粒径と淘汰係数の鉛直分布を図-8に示す。表面から4cm付近に粗粒子(約1mm)が堆積しており、そこから上層に向かって細粒子が堆積し、表面では再び粗粒子が堆積している。

図-9に中間型波浪条件下の結果を示す。バームやバーのような特徴的な地形は形成されていないが、潮位の上昇に伴い岸向きの漂砂量のピークとなる位置が岸側に移動し、沖向きの漂砂量が減少している。高潮位から平均潮位の下げ潮時に沖向きの漂砂量が增大するが、下げ潮の後半では岸向きの漂砂となっている。卓越粒径は細粒子と粗粒子が交互になっており、低潮位から高潮位の間の漂砂量は多くないが、粒径の変動幅は大きい。

図-10に侵食型の結果を示す。沖側に形成されたバームは上げ潮に伴い陸側に移動しており、漂砂量も徐々に減少してくる。トロフでは岸向きの漂砂量が卓越し、バーム頂付近は沖向きになっている。下げ潮時の方が漂砂

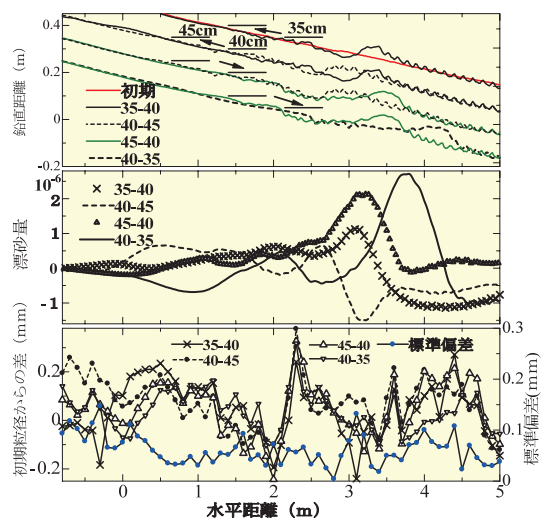


図-10 侵食型波浪の実験結果

量も多くなるが、粒径の変動は堆積型と比較して著しくない。低潮位の汀線付近を境にして粒度特性が著しく変化している。

4. 数値モデル

(1) 基礎式

波浪場の基礎式は辻本ら(2008)と同様に岸沖方向1次元の連続式と拡張型ブーシネスク方程式を用いた。本計算における碎波判定には、水表面における水粒子速度と波速との比の値が0.7を超えた時に碎波が生じるとした。

潮位変化が生じた場合移動する底質特性が異なることが室内実験で明らかになっており、また山田ら(2009)もX線CTを用いて底質の湿潤密度が地形変化と共に変動することを示しており、底質特性の変化を時空間的に

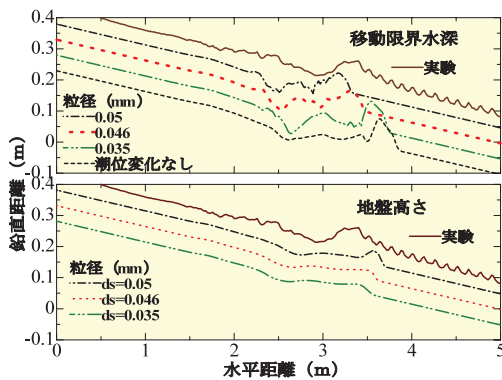


図-11 計算結果

考慮する必要があるが、ここでは、Bailardによって提案された漂砂量公式で移動量を算定し、地形の連続式から地盤高さを計算した。

潮位の影響は水深を直接上下動させることで表現が可能ではあるが、本計算では初期水深と静水面からの水位変動の和を変数として扱っており、また、波浪と地形の計算時間間隔と数オーダー異なるため、水深は初期水深のままにして①基準面からの地盤の高さを低下させる②底質の移動限界水深を変化させることで潮位の影響を考慮した。具体的には地形の計算ルーチンで①では地盤高さを計算後、上げ潮時には地盤を下げ、下げ潮時には地盤を上げ、②では底質の移動限界水深を上げ潮時に浅く、下げ潮時に深くした。粒径の影響を検討するために3種類の粒径を与えた。

(2) 計算結果

図-11に低潮位から平均潮位に潮位を変化させ、侵食型の波(表-2の低潮位時の有義波を規則波として与えた)を作用させた時の計算結果を示す。煩雑さを避けるために縦軸の原点は0.5m毎下げて地形を描いている。実験では水平距離3m付近にトラフ、3.3m付近にバーが形成されている。粒径0.46mmとして移動限界水深を変化させる方がバーの位置や高さ、トラフの位置について実験結果との対応が良好である。用いた粒径によりバーやトラフの位置が異なり、粗粒子になるにつれてより岸側に移動している。計算の空間格子幅が2cm程度であるために、実験で見られた沖側砂漣等は計算では再現されない。

5. 結論

- ①潮位変動の影響下では、上げ潮時と下げ潮時における、漂砂の移動量が均等状態ではなく、また、卓越して移動する底質粒径も異なる。
- ②堆積部の下層には粗粒子が存在し、その上に細粒子が重なる層状となっている。
- ③底質の相関係数の鉛直分布より粒子の分級特性を定量

的に評価できる。

- ④数値モデルでは上げ潮・下げ潮の水位変化を移動限界水深や地盤高差で考慮できるが、移動する卓越粒径が異なるため、その影響を取り込む必要がある。

謝辞：本研究の一部は科学研究補助金基盤研究(c)(代表：辻本剛三、課題番号21560547)により行われた。現地調査は、当時神戸市立高専学生甲斐田秀樹君、浜口蘭子さん、熊本大学大学院生田中直樹、田端優憲、学部田川一彦君、郷原慎一郎君にご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 宇多高明・小俣 篤・竹舘 勉(1989):前浜における底質粒径の時空間変化とバームの形成機構, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.359-363.
- 斉藤 晃(1973):潮位変化による海浜砂礫粒度の変動, 第20回海岸工学講演会論文集, pp.351-355.
- 服部昌太郎・井崎嘉幸(1981):平均水位変動下での岸沖漂砂と海浜変形, 第28回海岸工学講演会論文集, pp.202-206.
- 辻本剛三・細山田得三・柿木哲哉・宇野宏司(2008):不規則波によるフィルター層を有する海浜断面の可逆性から見た安全性について, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.746-750.
- 辻本剛三・山田文彦・柿木哲哉(2008):粒子画像を用いた底質粒径の計測方法の妥当性に関する研究, 海洋開発論文集, Vol.36, pp.464-468.
- 辻本剛三・山田文彦・酒井大樹・甲斐田秀樹・柿木哲哉(2010):フィルター層を有する人工海浜の岸沖断面地形の季節変動に関する研究, 海洋開発論文集, Vol.26, pp.1209-1214.
- 山田文彦・辻本剛三・蒲原さやか・池田有希・外村隆臣・Ilic Suzanna(2009):X線CTを用いた海浜断面変形を伴う底質内部の密度・空隙の時空間変動解析, 土木学会論文集B2(海岸工学), B2-65, pp.681-685.
- 柿木哲哉・辻本剛三(2009):遡上域における分級過程のリアルタイム計測, 土木学会論文集B2(海岸工学), B2-65, pp.512-525.
- Ciavola, P., R., Taborda, O., Ferreira and J. A., Dias(1997):Field observations of sand-mixing depths on steep beaches, Marine Geology 2, pp.147-156.
- Gonzalez-Villanueva, R., S.Costas, I. Alejo and M.Perez-Arlucea(2007):Morphological changes force by the tidal cycle in a low energy estuarine beach, J. Coastal Research, SI 50, pp.1010-1014.
- Jackson, N. L. Nordstrom, K. L., Eliot, I. and Masseilink, G.(2002):Low-energy sandy beaches in marine and estuarine environments: a review, Geomorphology, 47, pp.147-162.
- Hegge, B., Eliot, I. And Hsu, J.(1996):Sheltered sandy beaches of southwestern Australia, J. Coastal Research, 12, pp.748-760.
- Rubin D. M(2004):A simple autocorrelation algorithm for determining grain size from digital image of sediment, J. Sedimentary Research, Vol.74, No.1, pp.160-165.
- Sherman, D. J., K. F., Nordstrom, N. L., Jacson and J. R. Allen(1994):Sediment mixing-depths on a low-energy reflective beach, J. Coastal Research, 10, pp.297-305.
- Trim, L. K., K. She and D. J. Pope(2002):Tidal effects on cross-shore sediment transport on a shingle beach J. Coastal Research, SI 36, pp.708-715.